

УДК 621.3.011.7

**О. О. Лазарєв, к. т. н., доц.; К. В. Огородник, к. т. н., доц.; Р. Ю. Чехместрук;
М. А. Філінюк, д. т. н., проф.**

ДОСЛІДЖЕННЯ СХЕМОТЕХНІЧНИХ РЕАЛІЗАЦІЙ С-НЕГАТРОНІВ НА КОНВЕРТОРАХ ВІД'ЄМНОГО ОПОРУ

У роботі розглянуто чотири основні схеми С-негатронів на конверторах від'ємного опору на операційних підсилювачах (ОП). Показано, що під час використання позитивного зворотного зв'язку за напругою реалізується активний С-негатрон, за струмом – пасивний С-негатрон. Найбільші максимальні робочі частоти мають схеми на U-ПІ-конверторах. Перевагою схем С-негатронів на ОП є простота, висока точність, реалізація значення від'ємної ємності, широкий частотний діапазон роботи.

Ключові слова: С-негатрон, операційний підсилювач, конвертор, від'ємний опір.

Вступ

Перспективним шляхом підвищення ефективності сучасних електронних пристроїв є використання нової елементної бази, зокрема С-негатронів – електронних приладів, що в певному режимі роботи мають від'ємне значення диференційної ємності [1, 2].

В основі схемотехнічної реалізації С-негатронів лежать перетворювачі імпедансу (ПІ), що забезпечують необхідний фазовий зсув між напругою і струмом та перетворення додатної ємності (індуктивності) навантаження у від'ємну вхідну ємність. Перетворювачі від'ємного імпедансу будують на активному приладі – підсилювачі, охопленому позитивним зворотним зв'язком. У якості підсилювача в ПІ можуть використовуватися різні активні прилади, однак операційні підсилювачі (ОП) є універсальними та зручними приладами, що дозволяють будувати ПІ, параметри яких не залежать від передатної характеристики активних приладів, а визначаються параметрами елементів кіл зворотного зв'язку, забезпечують схемотехнічну простоту реалізації, широкий частотний діапазон роботи від 0 до сотень МГц, оскільки частота одиничного підсилення сучасних високошвидкісних ОП досягає 1,5 ГГц [3].

Основи побудови перетворювачів імпедансу на операційних підсилювачах закладено в монографіях Ф. Бенінга [4], Ж. Марше [5], І. М. Філановського та інших [6], у них узагальнено та систематизовано власні напрацювання, а також інших науковців. Необхідно зауважити, що схеми ПІ на базі ОП дозволяють реалізувати як від'ємний активний опір, так і від'ємну ємність та від'ємну індуктивність, що буде визначатися лише типом імпедансу навантаження. Проте математичні моделі реалізованих негатронів при цьому будуть різними.

Мета роботи

Метою роботи є визначення математичних моделей та основних параметрів схемотехнічних негатронів на ОП.

Теоретичне обґрунтування побудови С-негатронів на ОП

Перетворювачі від'ємного імпедансу будують на активному приладі – підсилювачі, охопленому позитивним зворотним зв'язком. При цьому під час використання позитивного послідовного зворотного зв'язку за напругою або паралельного зворотного зв'язку за струмом реалізуються конвертори від'ємного опору, для яких від'ємний вхідний імпеданс Z_{ex} пропорційний імпедансу навантаження Z_n . Під час використання позитивного паралельного зворотного зв'язку за напругою або послідовного зворотного зв'язку за струмом інвертори (гіратори) мають від'ємний опір, для якого від'ємний вхідний імпеданс Z_{ex} зворотно пропорційний імпедансу навантаження Z_n [4].

Перетворювачі від'ємного імпедансу поділяють на перетворювачі імпедансу зі зміною

напряму струму (І-ПІ) та на перетворювачі імпедансу зі зміною знака напруги (U-ПІ).

ПІ на ОП належать до мостових ПІ [4]. Схеми ПІ на ОП можна загалом представити в такому вигляді (рис. 1). На рис. 1а – схема, входом якої є неінвертувальний вхід ОП, на рис. 1б – схема, входом якої є інвертувальний вхід ОП.

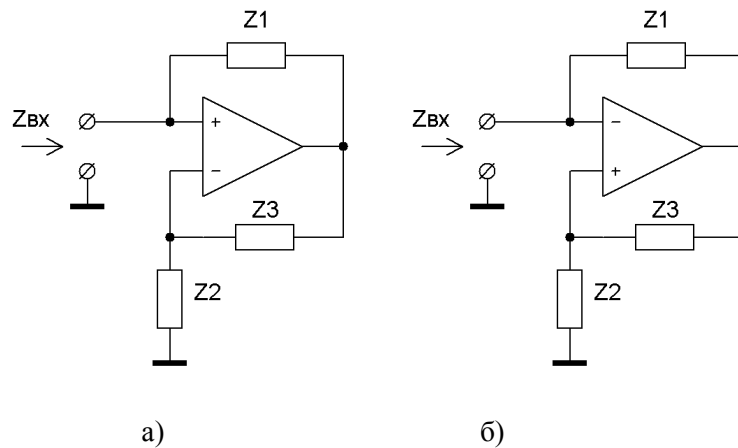


Рис. 1. Схеми ПІ на ОП: а) входом є неінвертувальний вхід ОП; б) входом є інвертувальний вхід ОП

Для схем на рис. 1 вхідний імпеданс визначають виразом [7]

$$Z_{\text{вх}} = Z2 \cdot Z1 / Z3.$$

З цього виразу видно, що, підставивши замість $Z1$ або $Z2$ у якості навантаження додатну ємність, на вході одержимо від'ємну ємність. Схема буде працювати як конвертор від'ємного опору. Для імпедансу $Z3$ схеми працюють як інвертори від'ємного опору, тому, підставивши замість $Z3$ індуктивність, на вході одержимо від'ємну ємність. Отже, загальна кількість можливих схем С-негатрона на базі конвертора від'ємного опору на ОП становить 4. Необхідно зауважити, що ці схеми дозволяють реалізувати також R-негатрон та L-негатрон, що визначатиметься лише типом імпедансу навантаження.

Дослідження С-негатрона на конверторі від'ємного опору на ОП

Узагальнені схеми С-негатрона на конверторі від'ємного опору наведено на рис. 2 [5, 7]. У схемі рис 2а резистори $R1$, $R2$ утворюють коло негативного зворотного зв'язку, що визначає коефіцієнт підсилення $K_n = \frac{R1 + R2}{R2}$. Коефіцієнт конверсії імпедансу визначають

виразом $K_k = \frac{1}{1 - K_n} = -\frac{R2}{R1}$. За умови, що $K_n > 1$, тобто якщо $R1 > 0$, коефіцієнт конверсії є від'ємним $K_k < 0$. Ємність C_n є навантаженням конвертора й утворює коло позитивного зворотного зв'язку за напругою. Вхідний імпеданс схеми $Z_{\text{вх}} = K_k Z_n = \left(-\frac{R2}{R1}\right) \frac{1}{j\omega C_n}$. Ємність

на вході конвертора визначають виразом $C_{\text{вх}} = \frac{1}{K_k} C_n$. Якщо $R1 = R2$, то коефіцієнт підсилення $K_n = 2$, коефіцієнт конверсії $K_k = -1$, ємність на вході $C_{\text{вх}} = -C_n$. Схема на рис. 2 працює як U-ПІ.

У літературі ця схема одержала також назву конвертора від'ємного опору з незаземленим навантаженням [5], та також схемотехнічної реалізації від'ємної ємності на ефекті Міллера [8, 9].

Ефект Міллера полягає в тому, що вхідна ємність інвертувального підсилювача напруги

дорівнює $C_{\text{ex}} = C(1 + K)$, де K – коефіцієнт підсилення, C – прохідна ємність. Під час використання неінвертувального підсилювача з коефіцієнтом підсилення $K > 1$ одержуємо від’ємну ємність $C_{\text{ex}} = -C(K - 1)$.

У розглянутій схемі ємність C_n є прохідною ємністю неінвертувального підсилювача. Якщо $K = 2$, то $C_{\text{ex}} = -C_n$.

На рис. 2б наведено схему С-негатрона на І-ПІ [5, 7]. Коефіцієнт конверсії імпедансу визначають виразом $K_K = -\frac{R1}{R2}$. Ємність на вході $C_{\text{ex}} = \frac{1}{K_K} C_n = -\frac{R2}{R1} C_n$. Якщо $R1 = R2$, то коефіцієнт конверсії $K_K = -1$, ємність на вході $C_{\text{ex}} = -C_n$. У схемі використовують позитивний зворотний зв’язок за струмом.

Обидві розглянуті вище схеми конверторів на ОП дозволяють реалізувати від’ємну ємність, проте вони не є рівнозначними, оскільки еквівалентні схеми реалізованих С-негатронів будуть різними, що визначається типом використаного позитивного зворотного зв’язку. Під час використання позитивного зворотного зв’язку за напругою реалізується С-негатрон N-типу, який є активним приладом [10, 11], і його еквівалентна схема складається з послідовно з’єднаних від’ємної ємності $C^{(-)}$ та від’ємного активного опору $R^{(-)}$. Під час використання позитивного зворотного зв’язку за струмом реалізується С-негатрон S-типу, який є пасивним приладом, і його еквівалентна схема складається з послідовно з’єднаних від’ємної ємності $C^{(-)}$ та додатного активного опору R . Для різних типів С-негатронів є дійсними різні умови стійкості [12].

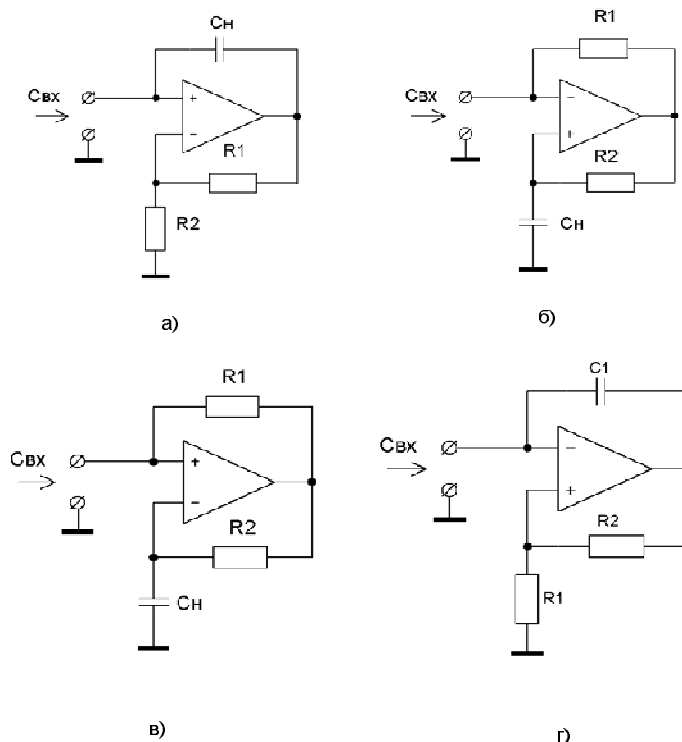


Рис. 2. Схемотехнічні С-негатрони на конверторі від’ємного опору на ОП:

а) – з позитивним зворотним зв’язком за напругою; б) – з позитивним зворотним зв’язком за струмом; в) – з позитивним зворотним зв’язком за напругою; г) з позитивним зв’язком за струмом на U-ПІ

Для перевірки адекватності одержаних теоретичних положень проведемо комп’ютерне моделювання цих схем. Схему для моделювання С-негатрона на конверторі від’ємного опору на ОП з позитивним зворотним зв’язком за напругою показано на рис. 3.

На рис. 4 показано графіки частотної залежності активного та реактивного складників

вхідного опору та значення ємності цієї схеми.

Із графіків видно, що ємність є від'ємною та її значення на низьких частотах становить – 100 нФ. Максимальна частота реалізації від'ємної ємності становить 564 кГц. Під максимальною частотою в цьому випадку розуміємо частоту, на якій значення ємності переходить у додатне значення. Активний опір є від'ємним і становить на низьких частотах 0,318 Ом. Максимальна частота, до якої активний опір є від'ємним, становить 705 кГц.

Необхідно зауважити, що таке значення від'ємного активного опору виникає внаслідок частотної залежності коефіцієнта підсилення й не враховує активний опір виводів конденсатора та з'єднань, що також будуть конвертуватися у від'ємне значення. За умови їхнього врахування, значення від'ємного активного опору буде відповідно більшим. Так, якщо під час моделювання врахувати опір виводів, наприклад 1 Ом, то значення від'ємного активного опору становитиме –1,318 Ом.

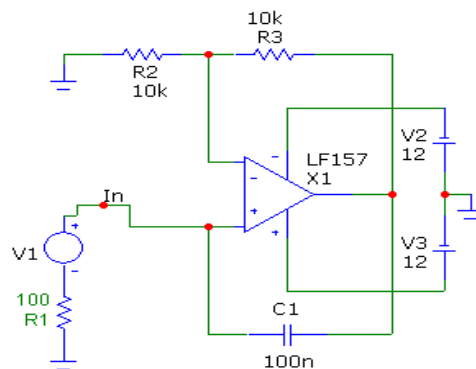


Рис. 3. Електрична схема С-негатрона на ОП для моделювання в MicroCap 8.0

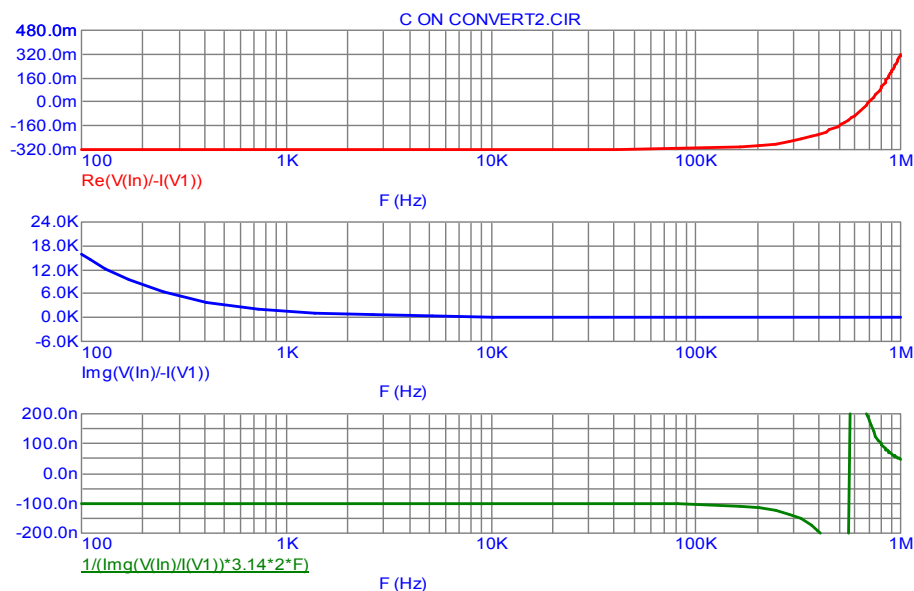


Рис. 4. Частотні залежності активного та реактивного складників вхідного опору та значення ємності С-негатрона, представленого на рис. 3

Для теоретичного розрахунку значення від'ємного опору та опису частотної залежності від'ємної ємності використаємо однополіусну апроксимацію частотної залежності коефіцієнта підсилення [13]:

$$K_{\kappa} = \frac{K_0}{1 + j \frac{\omega}{\omega_1} K_0},$$

де K_0 – коефіцієнт підсилення схеми на низьких частотах, ω_1 – кутова частота одиничного підсилення.

Вхідний імпеданс схеми визначають виразом:

$$Z_{\text{вх}} = \frac{1}{1 - K_n} Z_n = \frac{Z_n}{1 - \frac{K_0}{1 + j \frac{\omega}{\omega_1} K_0}}.$$

Звідки активний складник вхідного імпедансу:

$$\text{Re}(Z_{\text{вх}}) = -\frac{K_0^2 \omega_1}{C(K_0^2 \omega^2 + K_0^2 \omega_1^2 - 2K_0^2 \omega_1^2 + \omega_1^2)},$$

реактивний складник вхідного імпедансу:

$$\text{Im}(Z_{\text{вх}}) = -\frac{K_0^2 \omega^2 - K_0^2 \omega_1^2 + \omega_1^2}{\omega C(K_0^2 \omega^2 + K_0^2 \omega_1^2 - 2K_0^2 \omega_1^2 + \omega_1^2)}.$$

На низьких частотах $\omega \rightarrow 0$ ці вирази можна спростити і представити у вигляді

$$\text{Re}(Z_{\text{вх}}) = -\frac{K_0^2}{\omega_1 C (K_0 - 1)^2},$$

$$\text{Im}(Z_{\text{вх}}) = \frac{1}{\omega C (K_0 - 1)}.$$

Для операційного підсилювача LF157, що використовується для моделювання, $f_1 = \frac{\omega_1}{2\pi} = 20$ МГц. За одержаним виразом розраховано значення від'ємного активного опору С-негатрона (рис. 3), яке на низьких частотах становить $-318,3$ мОм, що узгоджується з результатами моделювання.

З одержаних виразів для частотної залежності вхідного імпедансу видно, що зі збільшенням частоти значення від'ємного активного опору та ємності за модулем будуть зменшуватися, але визначити максимальні частоти для від'ємного активного опору та від'ємної ємності одноплюсна апроксимація коефіцієнта підсилення не дозволяє (необхідно використовувати апроксимації більш високих порядків). З отриманих виразів випливає, що максимальна частота залежить не лише від f_1 , а також і від K_0 та значення ємності навантаження, що підтверджено результатами моделювання.

Якщо резисторами R_2 , R_3 в схемі, представленій на рис. 3, забезпечити коефіцієнт підсилення 100, тобто в 50 разів більший, то за результатами моделювання значення реалізованої від'ємної ємності збільшиться до $-9,9$ мкФ, а максимальна частота зменшиться до 80 кГц, що приблизно в $\sqrt{50}$ разів менше від попереднього значення. Значення від'ємного активного опору зменшиться до -81 мОм, а максимальна частота зменшиться до 639 кГц. Отже, збільшення коефіцієнта підсилення призводить до збільшення значення реалізованої від'ємної ємності та до зменшення максимальної частоти.

Якщо для схеми на рис. 3 ємність навантаження зменшити до $C_1 = 1$ нФ, то значення реалізованої від'ємної ємності буде -1 нФ, а максимальна частота зросте до 4,95 МГц. Значення від'ємного активного опору зменшується до $-31,8$ мОм, а максимальна частота

зростає до 6,86 МГц. Тобто зменшення ємності навантаження в 100 разів призводить до збільшення максимальної частоти приблизно в 10 разів.

Результати моделювання засвідчили, що збільшення f_1 в k разів призводить до збільшення максимальної частоти приблизно в \sqrt{k} разів. Так, при збільшенні f_1 ОП в 5 разів до значення 100 МГц для схеми на рис. 3 одержимо максимальну частоту від'ємної ємності 1,263 МГц, що в 2,24 рази більше від попереднього значення.

Проведений аналіз роботи схеми дозволяє визначити основні параметри реалізованого С-негатрона та частотний діапазон його роботи, використовуючи емпіричний вираз

$$f_{\max} \approx 1,77 \sqrt{\frac{f_1}{20} \frac{C_n}{10} \frac{K_0}{2}} \text{ [МГц]}, \text{ де } f_1 - \text{частота одиничного підсилення ОП в МГц, } C_n -$$

ємність навантаження в нФ, K_0 – коефіцієнт підсилення схеми на низьких частотах. Так, наприклад, якщо реалізувати від'ємну ємність -100 пФ, використовуючи ОП з $f_1 = 1000$ МГц, $K_0 = 2$, $C_n = 100$ пФ, то максимальна частота реалізованої від'ємної ємності $f_{\max} \approx 125$ МГц.

Схему для моделювання С-негатрона на конверторі від'ємного опору на ОП з позитивним зворотним зв'язком за струмом показано на рис. 5.

На рис. 6 показано графіки частотної залежності активного та реактивного складників опору та значення ємності цієї схеми. З графіків видно, що ємність є від'ємною, а її значення на низьких частотах -100 нФ, що узгоджується з одержаними вище теоретичними виразами. Максимальна частота реалізації від'ємної ємності дорівнює 52 кГц. На більших частотах реактивний опір починає збільшуватися та набувати характер індуктивності. Активний опір є додатним і дорівнює 324 Ом на частоті 10 кГц. Результати моделювання підтверджують одержані вище теоретичні положення.

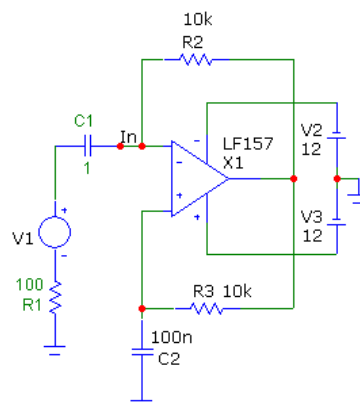


Рис. 5. Схема С-негатрона на ОП з позитивним зворотним зв'язком за струмом для моделювання в MicroCap 8.0

Отже, розглянута схема реалізує пасивний С-негатрон. Максимальна частота для С-негатрона цієї схеми на порядок менше, ніж для схеми на рис. 3. Значення опорів у колах зворотного зв'язку впливають на максимальну частоту С-негатрона цієї схеми. Так, при зменшенні опорів до $R2 = R3 = 100$ схема реалізує таку саму від'ємну ємність -100 нФ, але максимальна частота зростає до 425 кГц.

На рис. 2в показано схему С-негатрона на конверторі від'ємного опору з позитивним зв'язком за напругою на І-ІІІ [7]. Вхідний опір схеми $Z_{\text{ex}} = K_{\kappa} Z_n = -\frac{R2}{R1} \frac{1}{j\omega C_n}$, де $C_n = C_1$.

Ємність на вході $C_{\text{ex}} = \frac{C_n}{K_{\kappa}} = -\frac{R1}{R2} C_n$. Якщо $R1 = R2$, то коефіцієнт конверсії $K_{\kappa} = -1$, ємність

на вході $C_{ex} = -C_n$. У схемі використовують позитивний зворотний зв'язок за напругою.

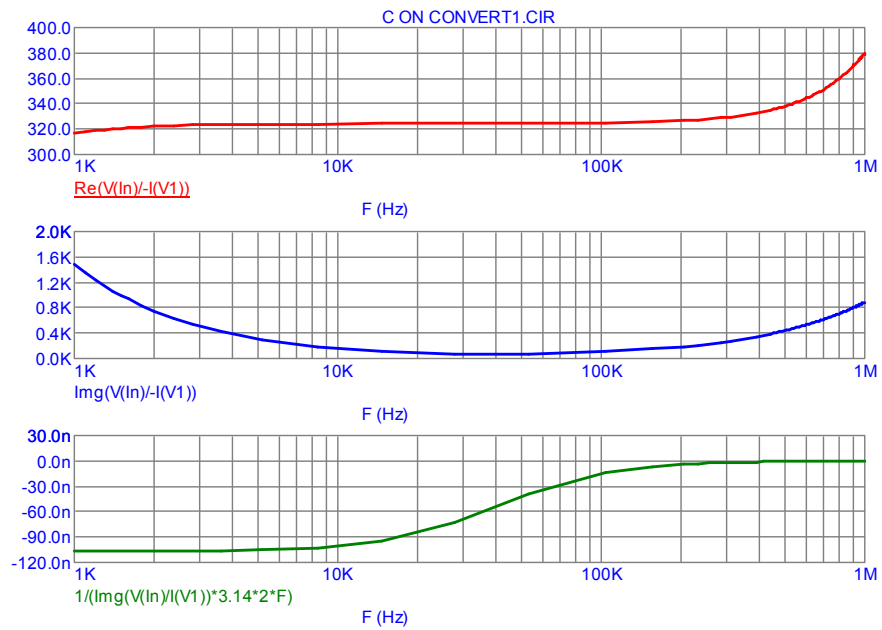


Рис. 6. Частотні залежності активного та реактивного складників опору та значення ємності С-негатрона, представленого на рис. 5

Для моделювання використовують схему, показану на рис. 7.

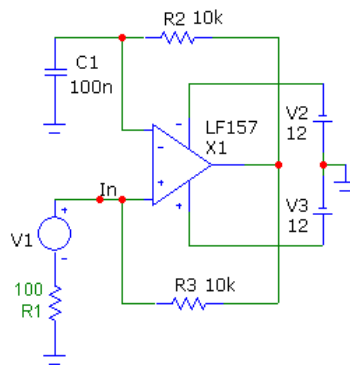


Рис. 7. Електрична схема С-негатрона на І-ІІ з позитивним зворотним зв'язком за напругою

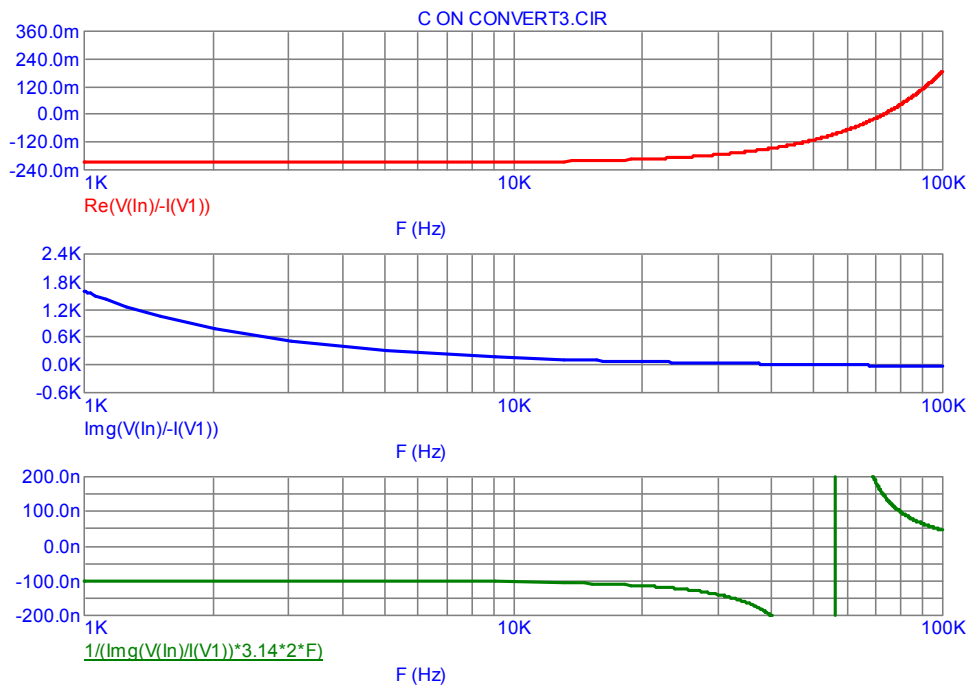


Рис. 8. Частотні залежності активного та реактивного складників входного опору та значення ємності С-негатрона, представленого на рис. 7

З графіків (рис. 8) випливає, що схема реалізує активний С-негатрон. Значення від'ємного активного опору дорівнює -209 мОм, значення від'ємної ємності -100 нФ, максимальна частота від'ємної ємності 56 кГц. Частотні характеристики схеми, як і в попередньому випадку, залежать від значень резисторів у колах зворотного зв'язку. Так, при $R_2=R_3=100$ схема реалізує від'ємну ємність -100 нФ, максимальна частота 399 кГц. Частотні властивості схеми, як і попередньої, на порядок гірші за схему на рис. 3.

На рис. 2г показано схему С-негатрона на конверторі від'ємного опору [7] з позитивним зв'язком за струмом на U-ПІ. Коефіцієнт конверсії імпедансу схеми дорівнює $K_k = -\frac{R_1}{R_2}$.

Ємність на вході $C_{\text{вх}} = \frac{C_n}{K_k} = -\frac{R_2}{R_1} C_n$. Якщо $R_1 = R_2$, то коефіцієнт конверсії $K_k = -1$, ємність на вході $C_{\text{вх}} = -C_n$. Схема, яку використовують для моделювання, показано на рис. 9.

Результати моделювання схеми на рис. 9 показано на рис. 10, з них видно, що схема реалізує пасивний С-негатрон. Значення від'ємної ємності -100 нФ, значення активного опору -318 мОм, максимальна частота від'ємної ємності -574 кГц. На більших частотах реактивний опір починає збільшуватися і набуває характер позитивної індуктивності. Частотні властивості схеми аналогічні до схеми С-негатрона, реалізованої (рис. 3) також на U-ПІ, але зі зворотним зв'язком за напругою.

Проведений аналіз роботи чотирьох схем С-негатронів показав, що найкращою за частотними властивостями для реалізації активного С-негатрона є схема на рис. 2а, для пасивного – на рис. 2г. Схеми на рис. 2б і 2в також реалізують пасивний та активний С-негатрони відповідно, але мають менші робочі частоти.

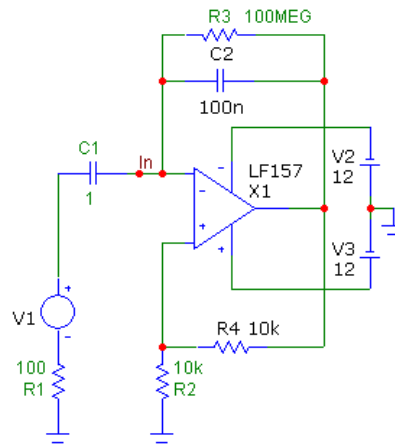


Рис. 9. Схема С-негатрона на ОП для моделювання в MicroCap

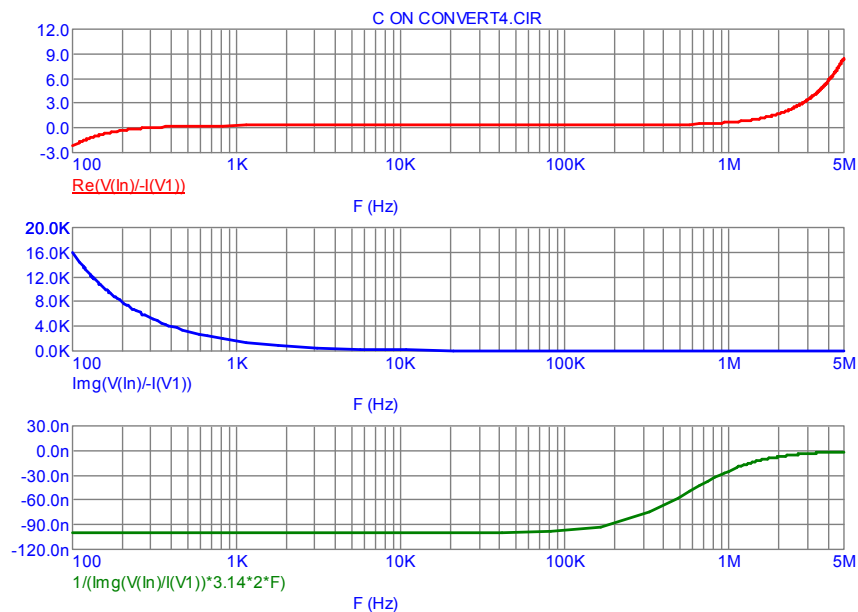


Рис. 10. Частотні залежності активного та реактивного складників вхідного опору та значення ємності С-негатрона на рис. 9

Висновки

1. В основі схемотехнічних С-негатронів на ОП лежать перетворювачі імпедансу мостового типу. Для реалізації С-негатрона на ОП є чотири основні схеми на конверторах від'ємного опору.

2. Розглянуті схеми С-негатронів на ОП працюють у діапазоні частот 0,01 Гц ... 100 МГц і дозволяють реалізувати від'ємну ємність у діапазоні значень $-0,1$ пФ... -1 Ф. Максимальні робочі частоти С-негатрона залежать від параметрів схеми і становлять близько $0,1 f_1$, де f_1 – частота одиничного підсилення ОП.

3. Тип позитивного зворотного зв'язку, що використовують у схемі ПЗ, визначає тип С-негатрона. Схеми, у яких використовують позитивний зворотний зв'язок за напругою, реалізують активний С-негатрон (або С-негатрон N-типу), еквівалентна схема якого складається з послідовно з'єднаної від'ємної ємності та від'ємного активного опору. Схеми, у яких використовують позитивний зворотний зв'язок за струмом, реалізують пасивний С-негатрон (або С-негатрон S-типу), еквівалентна схема якого складається з послідовно з'єднаної від'ємної ємності та додатного активного опору. Одержані результати узгоджуються з отриманими раніше теоретичними висновками, які приведено в [10, 11].

4. Найкращою за частотними властивостями для реалізації активного С-негатрона є схема на рис. 2а на U-ПІ з позитивним зворотним зв'язком за напругою, для реалізації пасивного С-негатрона – схема на рис. 2г на U-ПІ з позитивним зворотним зв'язком за струмом.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Філінюк М. А. Основи негatronіки. Т. 1. Теоретичні і фізичні основи негatronіки / М. А. Філінюк. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – 456 с.
2. Філінюк М. А. Основи негatronіки. Т.2. Прикладні аспекти негatronіки / М. А. Філінюк. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – 306 с.
3. AD8003. Triple, 1.5 GHz Op Amp. Analog Devices, Inc. One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A. – 2008. – 16 p.
4. Бенинг Ф. Отрицательное сопротивление в электронных схемах / Ф. Бенинг. – М.: Сов. радио, 1975. – 286 с.
5. Марше Ж. Операционные усилители и их применение. Пер. с франц. / Ж. Марше. – Л.: Энергия, 1974. – 216 с.
6. Филановский И. М. Схемы с преоб-разователями сопротивления. / И. М. Филановский, А. Ю. Персианов, В. К. Рыбин. – Л.: Энергия, 1973. – 192 с.
7. Patent USA № 29,080. Int. Cl.2 H03H 7/00, H03H 11/00. Compensated transformer circuit utilizing negative capacitance simulating circuit / F. J. Kiko, USA. Claimer and patent holder F. J. Kiko. – № 426826; published 17.12.76.
8. Säckinger E. Broadband circuits for optical fiber communication / E. Säckinger. – John Wiley and Sons. 2005. – 436 p.
9. Shem-Tov B. “A high-speed CMOS Op-Amp design technique using negative Miller capacitance,” / B. Shem-Tov, M. Kozak, E. G. Friedman // in Proceedings of 2004 11th IEEE International Conference of Electronics, Circuits and Systems. – December 2004. – P. 623 – 626.
10. Філінюк М. А. Дослідження енергетичних властивостей нелінійної ємності / М. А. Філінюк, О. О. Лазарєв // Вісник ВПІ. – 2000. – № 4. – С. 94 – 97.
11. Лазарєв О. О. Взаємозв'язок типу внутрішнього зворотного зв'язку з типом С-негатрона / О. О. Лазарєв, М. А. Філінюк // Вісник ВПІ. – 2009. – № 5. – С. 127 – 133.
12. Філінюк М. А. Дослідження стійкості навантажених С-негатронів / М. А. Філінюк, О. О. Лазарєв // Вісник ВПІ. – 2003. – № 3. – С. 90 – 96.
13. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. / Л. А. Бессонов. – М.: Высшая школа, 1996. – 625 с.

Лазарєв Олександр Олександрович – доцент кафедри проектування комп'ютерної та телекомунікаційної апаратури.

Огородник Костянтин Володимирович – доцент кафедри проектування комп'ютерної та телекомунікаційної апаратури.

Чехмestрук Роман Юрійович – магістрант кафедри проектування комп'ютерної та телекомунікаційної апаратури.

Філінюк Микола Антонович – завідувач кафедри проектування комп'ютерної та телекомунікаційної апаратури.

Вінницький національний технічний університет.